Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2023. (55-76)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Improving the Bearing Capacity of Shallow Foundations using Inclined Micropiles

Research Article

Shadan Abedini[1], Jafar Bolouri Bazaz[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79201.1184

1. Introduction

A micropile is an in-situ or precast small-diameter pile that was first utilized in the restoration and repair of historical buildings damaged during World War II. This improvement involves excavating holes beneath the structure and filling them with a mixture of cement grout and steel reinforcement. Micropiles typically have a diameter of less than 250 millimeters. Following their deployment in some projects in Boston and New York in 1973, the use of micropiles expanded. The availability of lightweight and small drilling equipment facilitated the application of this method, allowing micropile drilling to be performed in any condition and at any angle with minimal noise and environmental impact. Additionally, due to the small diameter of micropiles, it became possible to reinforce foundations even in challenging access situations.

Applying pressure during injection causes the surrounding soil of the micropile to compact due to the applied pressure. Moreover, as the grout infiltrates the soil voids and interstices, the shear resistance of the soil increases. Pressure injection causes the fluid portion of the grout to permeate into soil voids and interstices, creating a composite block that exhibits resistance against applied loads. This process results in a strong bond between the grout and the ground, leading to increased friction between the micropile and the soil. Additionally, grout injection into the soil contributes to soil improvement around the micropile. Therefore, despite the small diameter of micropiles, the use of this method significantly enhances the load-bearing capacity.

In recent construction projects, micropiles have been used for the construction of primary piles or the reinforcement of existing piles in various projects, such as high-rise construction. The advantages of using these elements include enhancing the resistance and load-bearing capacity of the pile, reinforcing the dynamic load-bearing capacity of the pile, and compacting the soil beneath it. These elements exhibit effective performance in structures exposed to cyclic and dynamic loads, such as wind loads, impacts from ship collisions, wave loads, etc. (FHWA). Concerning coastal structures, the lateral load imposed on the structure is typically between 10% and 15% of the vertical load, which can increase up to 30%.

In all previous research, the behavior of micropile-reinforced piles has been studied under vertical or horizontal loads independently, and the combined effect of these loads under various micropile installation conditions has not been addressed. The aim of this study was to investigate the behavior of micropile-reinforced piles under the simultaneous effect of vertical and horizontal loads. Additionally, previous research have not discussed the role of micropiles in the group behavior and the extent of this role under various deformation conditions. Therefore, this study examined the role of each micropile in group behavior and evaluates its role under different loading conditions and deformation scenarios.

2. Experimental program

To conduct research on a square pile reinforced with micropiles, it is necessary to construct a device through which horizontal and vertical forces can be applied to the pile. Therefore, a specific laboratory setup was designed for these experiments, consisting of various components, including a horizontal loading frame, soil retaining container, sand pouring system, water reservoir, and displacement measurement system.

A steel box was employed to contain soil from as reservoir with dimensions of 2 meters in length, 1 meter in width, and 1 meter in height. The reservoir walls on three sides were constructed from 10-millimeter thick steel, while on one side, it was made of 5-millimeter thick glass. To achieve uniform compaction of the soil (sand), it is necessary to uniformly distribute compaction in the sand reservoir. For this purpose, a system constructed in the soil mechanics laboratory of Ferdowsi University of Mashhad was utilized. This system consists of a triangular-shaped base reservoir mounted on a movable steel frame. The reservoir and frame have holes in which rods can be inserted, allowing the adjustment of the reservoir height and, consequently, the height of the applied load. The bottom gate of the reservoir also has various patterns, which are used to regulate the rainfall speed and the sand discharge rate. By adjusting the height of the rainfall surface to 80 centimeters, a compaction of 70% was achieved for conducting the experiments.

The aim of this study was investigating the impacts of micropiles on the geotechnical behavior of micropile-

*Manuscript received, October 15, 2022, Revised, July 16, 2023, Accepted, December 2, 2023.

[1] MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[2]. Corresponding author. Associated Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: bolouri@um.ac.ir

reinforced piles. Therefore, it is necessary for the pile to have sufficient rigidity and exhibit no deformation under applied loads. This process ensures that the measured deformation occurs only under the settlement of soil layers, and the deformation of the pile structure itself is not affected. For this purpose, a square steel pile with dimensions of 20 centimeters and a thickness of 10 millimeters was used. Moreover, for the connection of micropiles to the pile, couplers with the desired angle were utilized as Figure 1 shows.



Figure 1. A view of the couplers connected to the pile

The micropiles used in this study were formed from deformed rebars with a diameter of 12 millimeters, without ribs, and have lengths of 40 and 60 centimeters. The elastic modulus and moment of inertia for these micropiles were 200 GPa and 0.102 cm^4, respectively. Considering dimensional similarity, these values were equivalent to concrete micropiles with an elastic modulus of 48 MPa and a diameter of 30 centimeters. To consider the friction between the micropile and the surrounding soil, the surfaces of the rebars were coated with the sand.

The horizontal loading frame used in these studies must possess sufficient rigidity to avoid deformation or displacement during experiments. To achieve this, a hollow section was used to construct the horizontal loading frame. The frame consisted of two rebars with a diameter of 2 centimeters, spaced 1.5 meters apart and connected to each other at the top by a beam with a hollow section measuring 10×10 centimeters. Additionally, at the bottom of the columns, diagonal struts and plates were employed to control the sway of the frame. Figure 2 illustrates the loading grame.



Figure 2. The sand container along with the frame and water tank

To investigate the lateral behavior of micropile-reinforced piles, horizontal loading experiments were planned under various conditions. These experiments were conducted in two series, each involving two types of micropiles with lengths of 40 and 60 centimeters. Moreover, to assess the effect of the number of micropiles, arrangements of 2, 4, and 8 micropiles were considered. Before applying horizontal loads to each of the micropile-pile systems, a vertical load was applied to the pile. This vertical load was a percentage of the vertical load-bearing capacity of the system, with percentages of 0, 15, and 30 examined in this study.

3. Test results

To examine the collective behavior of micropiles, it is necessary to investigate the behavior of each individual micropile in a group and the role it plays in load-bearing. For this purpose, the parameter LI is defined using the Equation 1:

$$LI = \frac{F_g}{F_s} \quad (1)$$

In this equation, F_g represents the force applied to each individual micropile in a group under a specific displacement and F_s is the force applied to a single micropile under the same displacement.

As Figure 3 illustrates, an increase in the vertical load leads to the emergence of two different behaviors under different conditions. In the case of near failure, due to the expansion of the plastic zone around the micropiles and the interaction of their zones, an increase in the vertical load has little effect on LI. In other words, this increase does not have a significant impact on the efficiency of each micropile in a group. This is in contrast to the increase in the vertical load, which enhances the efficiency of micropiles in the 2-pile configuration (one on each side of the pile). This is due to the absence of an interfering zone in the vicinity of the micropiles. As evident, this behavior is observable for both micropile lengths.

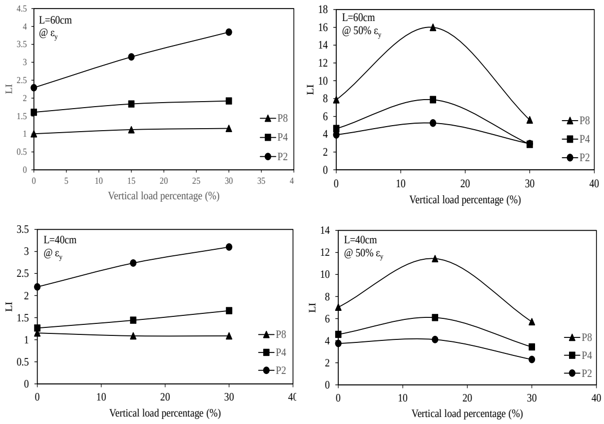


Figure 3. The results of the tests in different conditions

4. Conclusion

The most important findings of this study are as follows:

1) In conditions where the foundation is reinforced with a small number of micropiles (2 units), these micropiles, when the foundation is subjected to lateral loads, are unable to prevent the separation of the foundation from the soil;

2) One of the crucial parameters in the collective behavior of micropiles is the plastic zone around them. With an increase in the number of micropiles and their proximity to each other, the plastic zone expands. Due to the interference between micropiles and the reduction in the frictional force between micropiles and soil, the load-bearing role of each micropile diminishes with an increase in their number.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

بررسی رفتار جانبی پی تقویت شده با ریزشمع تحت اثر توأم بارگذاری قائم و افقی*

مقاله پژوهشی

شادان عابدینی(۱) جعفر بلوری بزاز (۲)

DOI:0000-0002-5106-1845

چکیده ریزشمع‌ها یکی از اجزا پرکاربرد در مهندسی عمران به جهت تقویت پی‌ها و یا به‌سازی خاک هستند. از این عناصر در پی توربین‌های بادی نیز بهره جسته می شود. پی این سازه‌های بلند علاوه بر نیروی قائم حاصل از وزن توربین، تحت اثر نیروی قابل توجه جانبی نیز قرار دارند. در این تحقیق نیز سعی شده است تا با مدل‌سازی پی تقویت شده با استفاده از ریزشمع به بررسی رفتار این پی مربعی با بعد ۲۰ سانتی‌متر تحت بار جانبی پرداخته شود. بدین منظور پی تقویت شده با تعداد ۲، ۴ و ۸ ریزشمع به طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری در داخل خاک ماسه‌ای و به صورت آزمایشگاهی مدل سازی شده و تحت بار جانبی استاتیکی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این تقویت در مواردی تا ۶ برابر ظرفیت باربری را بهبود داده است. از طرفی با بررسی رفتار گروهی ریزشمع مشاهده شد هنگامی که بار وارد شده از بار گسیختگی فاصله داشته باشد، طول ریزشمع‌ها تأثیر چندانی بر نقش هر ریزشمع در تأمین مقاومت جانبی ندارد و در بیشترین حالت (۸ ریزشمع سربار قائم ۱۵٪) این اختلاف ۳۰ درصد بوده است. همچنین در این تحقیق مشخص شد افزایش تعداد ریزشمع در حالات مختلف، باعث ایجاد دو رفتار متفاوت می‌شود. افزایش تعداد ریزشمع در حالت نزدیک به گسیختگی باعث افزایش نقش ریزشمع‌ها و در حالت دور از گسیختگی باعث کاهش نقش شده است. مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار این حالات، تعداد ریزشمع بوده است که در بیشترین حالت باعث افزایش ۲۰۰ درصدی نقش ریزشمع در رفتار گروهی آن گشته است.

واژه‌های کلیدی ظرفیت باربری جانبی، پی سطحی، ریزشمع، بار قائم، ماسه.

Investigation of Lateral Behavior Micropiled Foundation under Combined Lateral and Vertical Loading

Shadan Abedini Jafar Bolouri Bazaz

Abstract *Micropiles are one of the most widely used components in civil engineering to strengthen foundations or improve the soil. These elements are also used in wind turbines. In addition to the vertical force resulting from the weight of the turbine, these tall structures are also affected by significant lateral force. This paper aims to investigate the behavior of a square micropiled foundation with the dimension of 20 cm under lateral loading. For this purpose, the reinforced foundation with 2, 4, and 8 micropiles with lengths of 40 and 60 cm in the sandy soil has been modeled experimentally and subjected to static lateral load. Also, the effect of vertical surcharge load on lateral bearing capacity has been investigated in different conditions. The results of the tests revealed that this type of reinforcement has improved the bearing capacity up to 6 times in some cases. Studying micropile collective behavior unveiled that, distant from collapse, micropile length minimally affected individual lateral capacity. In the extreme scenario (8 micropiles, 15% overload), this discrepancy was 30%. Varying micropile numbers near collapse produced two contrasting behaviors: amplification in one and reduction in another case. The determining factor in both instances was the micropile quantity, leading to a remarkable 200% role increase in the most extreme conditions.*

Key Words Lateral bearing capacity, Shallow foundation, Micropile, Vertical load, Sandy soil.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۹/۱۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

Email: bolouri@um.ac.ir

مقدمه

ریزشمع یک شمع درجا ریز یا پیش‌ساخته با قطر کوچک است که برای اولین بار در بازسازی و تعمیر بناهای تاریخی که در طی جنگ جهانی دوم آسیب دیده بودند، مورد استفاده قرار گرفت. این به‌سازی از طریق حفر چاله‌هایی در زیر سازه و پر کردن آن با ملات سیمان و میلگرد فولادی انجام شده است [1]. ریزشمع‌ها معمولا دارای قطر کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر هستند. پس از به‌کارگیری این عناصر در بعضی از پروژه‌های شهر بوستون و نیویورک در سال ۱۹۷۳، استفاده از ریزشمع‌ها گسترش یافت. وجود تجهیزات حفاری سبک و کوچک این امکان را برای این روش فراهم می‌کرد تا حفاری چاهک ریزشمع، در هر شرایطی و در هر زاویه‌ای، با کمترین میزان دست‌خوردگی و آلودگی صوتی انجام گیرد. همچنین به دلیل قطر کوچک ریزشمع، امکان تقویت پی‌های ساخته شده حتی با دسترسی سخت امکان‌پذیر گردید [2].

بر اساس آیین‌نامه FHWA ریزشمع‌ها بر اساس روش ساخت به ۴ دسته طبقه‌بندی می‌شوند. نوع A: تزریق دوغاب تحت وزن خود بوده و هیچ گونه فشار تزریقی اعمال نمی‌شود. نوع B: فشار تزریق برای پر کردن گمانه استفاده می‌شود و بین نیم تا یک مگاپاسکال متغیر است. نوع C: در این نوع چاهک ابتدا به وسیله تزریق ثقلی پر شده، سپس بعد از گیرش اولیه، تزریق تحت فشار حداقل ۱ مگاپاسکال از طریق لوله تزریق انجام می‌شود. نوع D نیز همانند نوع C است، با این تفاوت که برخلاف نوع C که تزریق ثانویه در کل طول چاهک اتفاق می‌افتد، در نوع D تزریق ثانویه از انتهای گمانه به سمت بالا و در اعماق مختلف انجام می‌شود.

اعمال فشار در هنگام تزریق باعث می‌شود تا خاک اطراف چاهک در اثر اعمال فشار متراکم شود و نیز با نفوذ ملات در خلل و فرج خاک، مقاومت برشی آن افزایش یابد [2].

تزریق تحت فشار باعث می‌شود تا بخش روان ملات به خلل و فرج داخل خاک نفوذ کرده و باعث ایجاد یک بلوک مرکب شود که در برابر بارهای اعمالی از خود مقاومت نشان می‌دهد. این فرایند باعث به وجود آمدن اتصال قوی بین ملات و زمین شده و در نتیجه اصطکاک بین ریزشمع و خاک افزایش پیدا کند. علاوه بر این، تزریق ملات در خاک باعث به‌سازی خاک اطراف ریزشمع نیز می‌شود؛ لذا استفاده از این روش با وجود قطر کم ریزشمع‌ها، ظرفیت باربری را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد [3] تا [6].

در ساخت‌وسازهای اخیر، ریزشمع‌ها به‌منظور ساخت پی اصلی و یا تقویت پی ساخته شده در پروژه‌های مختلف، نظیر ساخت و ساز بلندمرتبه، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از مزایای استفاده از این عناصر می‌توان به مقاوم‌سازی پی و تقویت ظرفیت باربری آن، تقویت ظرفیت باربری دینامیکی پی و متراکم شدن خاک زیر آن اشاره کرد. این عناصر در سازه‌هایی که در معرض بارهای رفت و برگشتی و دینامیکی هستند، مانند بار باد، بار ناشی از برخورد کشتی، بار موج دریا و... از خود عملکرد مناسبی نشان می‌دهند (FHWA). در خصوص سازه‌های فراساحلی، بار جانبی که به سازه وارد می‌شود معمولا بین ۱۰ تا ۱۵ درصد بار قائم بوده که می‌تواند تا ۳۰ درصد هم افزایش پیدا کند [2]، [7,8].

عملکرد پی تقویت شده با ریزشمع که تحت تأثیر توأم بار قائم و افقی است، به طور کلی با پی فاقد ریزشمع متفاوت است. در این نوع پی‌ها، بار جانبی و قائمی که به پی وارد می‌شود، بین ریزشمع‌ها و پی تقسیم می‌شود. بخشی از این بار توسط اصطکاک بین ریزشمع و خاک و بخشی دیگر توسط اصطکاک بین خاک و پی تحمل می‌شود [2] و [9]. در زمینه استفاده از ریز شمع‌ها چه به صورت گروهی و چه به صورت تک، تحقیقات زیادی انجام شده است که در ادامه خلاصه‌ای از هرکدام آورده می‌شود.

ال کماش و هن به بررسی عددی یک پی که به منظور تحمل بار قائم اضافی وارد بر آن با استفاده از ریزشمع تقویت شده است، پرداخته‌اند. در این تحقیق مشاهده گردید که نصب ریزشمع بعد از بارگذاری اولیه پی باعث افزایش نشست قائم گشته و میزان بار تحمل شده توسط ریزشمع نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نشست قائم پی با افزایش طول ریزشمع‌ها و کاهش میزان بارگذاری اولیه (قبل از کارگذاری ریزشمع‌ها)، کاهش می‌یابد [6]. النوم و همکاران [10] با مدل‌سازی ۲۶ حالت مختلف اجزای محدود و استفاده از مدل رفتاری موهر-کلومب، به بررسی رفتار قائم پی تقویت شده با ریزشمع، در خاک رسی با چسبندگی ۳۰ کیلوپاسکال پرداختند. در تحقیق آن‌ها مشخص گردید که ظرفیت باربری پی تقویت شده با ریزشمع ۱۰۰ درصد بیشتر از پی فاقد تقویت است. همچنین نشست پی در هنگامی کاهش یافت که ریزشمع‌ها در نزدیکی محل اعمال بار کارگذاری شده‌اند. همچنین تحقیقات دیگری که در خاک رسی انجام شده

است نشان داده است که میزان تحمل بار توسط پی تقویت شده با ریزشمع، با افزایش تعداد ریزشمع‌ها و همچنین افزایش فاصله بین آن‌ها، افزایش می‌یابد [11,12].

عبد العزیز و ال نگار [13] نیز با انجام ۲ عدد آزمایش استاتیکی و ۶ عدد آزمایش دینامیکی رفتار جانبی پی تقویت شده با ریزشمع را در خاک رسی لای‌دار متراکم تا خیلی متراکم مورد بررسی قرار دادند. همچنین نسبت به شبیه‌سازی عددی نیز اقدام کردند. بر طبق تحقیق آن‌ها، محل اتصال ریزشمع به پی از اهمیت زیادی برخوردار است و باید در هنگام اجرا با احتیاط مورد بررسی قرار بگیرد. در تحقیق دیگر، که به بررسی پارامتری ریزشمع‌ها تحت اثر بارجانبی به وسیله مدل‌سازی آزمایشگاهی، عددی و بزرگ مقیاس پرداخته است، مشخص گشت که زاویه کارگذاری ریزشمع و همچنین زاویه اعمال بار تاثیر قابل توجهی بر رفتار پی دارد. نتایج تحقیق شارما و همکاران [14] نیز نشان داد که حداکثر بار افقی قابل تحمل توسط سیستم پی- ریزشمع با افزایش نسبت طول به قطر تا عدد ۳۰ به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

تحقیقات مختلفی به بررسی پارامترهای مختلف ریزشمع بر میزان به‌سازی آن‌ها پرداخته‌اند. لی و همکاران [15] با کارگذاری ریزشمع‌هایی در مجاورت پی نشان دادند که زاویه کارگذاری ریزشمع‌ها، تأثیر به‌سزایی بر روی میزان به‌سازی و کاهش نشست‌ها دارد. از طرف دیگر تحقیقات مختلف نشان داده که میزان باربری قائم گروه ریزشمع با افزایش طول آن، افزایش می‌یابد [4] و [10-8]. فاصله ریزشمع‌ها از دیگر عوامل تأثیرگذار بر میزان به‌سازی است [7,11]. همچنین با کارگذاری ریزشمع‌ها در نزدیکی لبه پی میزان محدود کردن جابه‌جایی‌های افقی بیشتر می‌شود [16]. بتچارجی و همکاران [16] و جا و شوکلا [19] با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی دریافتند که ظرفیت باربری زیرسازی راه تقویت شده با ریزشمع، وابستگی زیادی به قطر ریزشمع دارد. از طرف دیگر تأثیر هر کدام از پارامترهای مؤثر بر کارایی ریزشمع، به‌صورت جداگانه توسط محققان مختلف در مقیاس بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. السعید [20] با مدل‌سازی فیزیکی پی مربعی تقویت شده با ریزشمع، پارامترهای مختلفی نظیر قطر، طول، زاویه کارگذاری ریزشمع‌ها و نحوه چینش و فاصله آن‌ها را از لبه پی، مورد بررسی قرار داده و برای هر کدام از این پارامترها با توجه به معیار دستیابی به کمترین میزان نشست و بیشترین ظرفیت باربری، مقدار بهینه‌ای استخراج کرد. همچنین در تحقیق دیگری تأثیر طول ریزشمع و تراکم خاک بر روی مقاومت جانبی و تغییر مکان پی تقویت شده با ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق نشان داده شد که افزایش طول ریزشمع بر روی مکانیزم گسیختگی تأثیرگذار است. در طول‌های کم خاک اطراف ریزشمع گسیخته گشته و در طول زیاد سازه ریز شمع دچار گسیختگی می‌گردد. در این تحقیق، این تفاوت رفتار ملاکی برای تعیین کوتاه یا بلند بودن ریزشمع‌ها گشته و حد تغییر رفتار برای تراکم‌های مختلف ۳۰، ۵۰ و ۸۰ درصد به ترتیب طول به قطر ۲۴–۲۱، ۲۱–۱۸ و ۱۲–۱۵ است [13,15].

به منظور بررسی رفتار جانبی ریزشمع در شرایط واقعی نیز لازم است آزمایش‌هایی در مقیاس‌های حقیقی نیز بر روی آن‌ها صورت پذیرد. بدین منظور کرشاو با انجام آزمون‌های میدانی به بررسی رفتار ریزشمع تحت اثر توأم بار قائم و جانبی پرداخته است. در این تحقیق که از شمع‌های بتنی به قطر ۱۷۸ میلی‌متر استفاده گردید، ابتدا ظرفیت باربری جانبی و قائم به‌صورت جداگانه تعیین شده و سپس اثر توأم آن‌ها بررسی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن سربار قائم بر روی شمع تک اثر چندانی بر ظرفیت باربری جانبی آن در خاک رس سخت ندارد [12].

در تمامی تحقیقات بیان شده رفتار پی تقویت شده با ریزشمع تحت اثر بار قائم یا بار افقی بوده است و اثر توأم این بارها در شرایط مختلف کارگذاری ریزشمع‌ها، مورد بحث قرار نگرفته است. هدف تحقیق حاضر بررسی رفتار پی تقویت شده با ریزشمع تحت اثر توأم بار قائم و افقی است. همچنین در تحقیقات گذشته بحثی در مورد نقش ریزشمع در رفتار گروهی و همچنین میزان این نقش در شرایط مختلف کرنشی، عنوان نشده بود. بر همین اساس در این تحقیق نقش هر ریزشمع در رفتار گروهی مورد بحث قرار گرفته و مقدار آن در حالات مختلف بارگذاری و شرایط مختلف کرنشی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اجزا و مصالح

چیدمان آزمایش‌ها

به‌منظور انجام تحقیق بر روی پی مربعی تقویت شده با ریزشمع

لازم است تا دستگاهی ساخته شود که با استفاده از آن بتوان نیروی افقی و قائم به پی وارد شود. ازاین‌رو چیدمان آزمایشگاهی مشخصی برای این آزمون‌ها در نظر گرفته شده است که بخش‌های مختلف آن عبارت است از: قاب بارگذاری افقی، مخزن نگه‌دارنده خاک، سیستم بارش ماسه، مخزن آب و تغییر مکان‌سنج. در ادامه هر یک از بخش‌ها توضیح داده شده است.

مخزن نگه‌دارنده خاک

در این تحقیق برای نگه‌داری خاک از یک مخزن به طول ۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر استفاده گردید. جداره مخزن در سه طرف آن از جنس فولاد و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و در یک سمت آن از جنس شیشه به ضخامت ۵ میلی‌متر است. ابعاد مخزن به گونه‌ای انتخاب گردید تا بر اساس تئوری بوزینکس [22] منحنی‌های تنش ناشی از بارگذاری پی، دیواره صلب کمترین تأثیر ناشی از خطای محصورشدگی در نتایج را داشته باشند. همچنین ضخامت و صلبیت مخزن به گونه‌ای انتخاب گردید تا به صورت کامل اطمینان حاصل کرد که در حین بارگذاری تغییر شکل نمی‌دهد.

سیستم بارش ماسه

به‌منظور رسیدن به تراکم همسان خاک (ماسه)، نیاز است تا در مخزن ماسه، تراکم به صورت یکنواخت توزیع گردد. بدین منظور از یک سیستم ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد استفاده گردید. این سیستم (که جزئیات آن در تحقیقات قبلی آمده) [23] متشکل است از یک مخزن با قاعده پایینی مثلثی شکل که بر روی یک قاب فولادی متحرک نصب شده است. بر روی چهارچوب مخزن و قاب سوراخ‌هایی تعبیه شده است تا بتوان با قرار دادن آن‌ها روبه‌روی یکدیگر ارتفاع مخزن و در نتیجه ارتفاع بارش تنظیم شود. همچنین دریچه پایین مخزن نیز دارای شابلون‌های مختلف بوده که با استفاده از آن‌ها سرعت بارش و دبی خروجی ماسه تنظیم می‌شود در این تحقیق با تنظیم ارتفاع در ۸۰ سانتی‌متری سطح بارش، تراکم ۷۰ درصد جهت انجام آزمایش‌ها حاصل گردید. لازم به ذکر است که این تراکم بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته قبلی انتخاب گردیده است [3]. به منظور کنترل تراکم بارش، در عمق‌های مختلف، با کارگذاری ۶ عدد قوطی فلزی و بارش ماسه بر روی آن اندازه‌گیری وزن مخصوص انجام شده است. این فرایند در هر ۱۵ سانتی‌متر بارش تکرار شده است. مقادیر تراکم نسبی اندازه‌گیری شده از لایه‌های پایینی به لایه‌های بالایی در بازه ۷۱ تا ۶۸ درصد بوده است. در نتیجه با توجه به تراکم مد نظر (۷۰ درصد)، تراکم به دست آمده دارای دقت قابل قبولی است.

پی و ریزشمع‌ها

در این تحقیق هدف بررسی تأثیرات ریزشمع بر روی رفتار ژئوتکنیکی پی تقویت شده با ریزشمع است، بنابراین لازم است تا پی از صلبیت کافی برخوردار باشد و در برابر بارهای وارد هیچ تغییر شکلی از خود نشان ندهد. این فرایند باعث می‌شود تا بتوان تغییر شکل اندازه‌گیری شده تنها تحت اثر نشست لایه‌های خاک باشد و تغییر شکل سازه‌ای پی در آن متأثر نباشد. بدین جهت از یک پی فولادی مربعی به بعد ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر و نیز به‌منظور اتصال ریزشمع‌ها به پی از کوپلرهایی که در شکل (۱) نشان داده شده با زاویه مورد نظر بهره جسته شده است.



شکل ۱ نمایی از کوپلرهای متصل شده به پی

در این تحقیق قانون تشابه ابعادی معرفی شده توسط وود [24] به منظور انتخاب ابعاد ریزشمع‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. بر طبق این قانون رابطه بین مشخصات مدل و نمونه واقعی به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\frac{E_m I_m}{E_p I_p} = \frac{1}{n^5} \qquad (۱)$$

که در آن E_m مدول الاستیسیته ریزشمع در مدل، E_p مدول الاستیسته ریزشمع در نمونه واقعی، I_m ممان اینرسی ریزشمع در مدل، I_p ممان اینرسی ریزشمع در نمونه واقعی و n ضریب

مقیاس برای طول است. در این تحقیق مشابه تحقیقات گذشته از مقیاس ۱۰ استفاده شد.

ریزشمع‌های مورد استفاده در این تحقیق از میلگرد بدون آج به قطر ۱۲ میلی‌متر در طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری تشکیل شده‌اند. مدول الاستیسیته ممان اینرسی ریزشمع‌ها به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۱۰۲ cm^4 که با توجه به تشابه ابعادی، معادل ریزشمع‌هایی بتنی با مدول الاستیسیته ۴۸ مگاپاسکال [25] و به قطر ۳۰ سانتی‌متر هستند. از طرف دیگر سایر ضرایب مقیاس نیز در جدول (۱) آورده شده که با توجه به مقیاس در نظر گفته شده ریزشمع‌های استفاده شده در این تحقیق معادل ریزشمع‌هایی به طول ۴ و ۶ متر در ابعاد واقعی هستند.

جدول ۱ ضرایب مقیاس

پارامتر	ضریب مقیاس
طول	۱:۱۰
وزن مخصوص	۱:۱۰
سختی	۱:۱۰
تنش	۱:۱۰
کرنش	۱
سختی خمشی ریزشمع	۱:۱۰^{۵}
نیرو	۱:۱۰^{۳}

مدل‌سازی ریزشمع‌ها به‌گونه‌ای بوده که بشود علاوه بر طول و تعداد ریزشمع‌ها، تأثیر نحوه چینش آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

به منظور در نظر گرفتن اصطکاک ریزشمع با خاک اطراف آن، جداره میلگردها با استفاده از ماسه مورد تحقیق، اندود شدند. برای ایجاد چسبندگی کافی ماسه و میلگرد از چسب چوب استفاده شده و در جهت اطمینان فرایند اندودکاری در دو مرحله صورت گرفت. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام گرفته توسط کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر، قطر ریزشمع پس از اندود ماسه در حدود ۱ میلی‌متر افزایش داشته است. این نوع کارگذاری میلگردها در مدل، تزریق نوع A (تزریق ثقلی) را شبیه‌سازی می‌کند. بدین جهت نیازی به در نظر گرفتن اثر تراکم خاک اطراف ریزشمع و همچنین پیاز تزریق اطراف آن نبوده است. همچنین به منظور بررسی اصطکاک ریزشمع و خاک از آزمایش برش مستقیم مطابق تحقیق انجام شده توسط پاستور و همکاران [26] بهره گرفته شد. در این آزمایش یک عدد صفحه فلزی ،که همانند ریزشمع مورد استفاده در مدل، با ماسه اندود شده است در فک پایینی قالب برش مستقیم قرار گرفته و در فک فوقانی ماسه با تراکم نسبی ۷۰ درصد بارش می‌شود. سپس با اعمال سربار قائم نسبت به لغزاندن دو فک بر روی یکدیگر اقدام می‌شود. با تکرار در تنش‌های قائم مختلف زاویه اصطکاک سطح اندود با ماسه به دست می‌آید. مقدار زاویه اصطکاک برای این تحقیق ۲۷,۲° بوده است که از مقایسه با مقادیر به دست آمده در تحقیقات قبلی، معادل اصطکاک ریزشمع بتنی در خاک است [26]. تصاویر طول‌های مختلف میلگرد و سطح ریزشمع قبل و بعد از اندودکاری به ترتیب در شکل‌های (۲) قسمت الف و ب آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ (الف) ریزشمع در دو طول ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر، (ب) سطح ریزشمع ماسه اندود شده و فاقد اندود در کنار یکدیگر

در مرحله بعد با اتصال ۸ کوپلر تحت زاویه ۳۰ درجه به پی و همچنین رزوه کردن ابتدای ریزشمع‌ها، تمهیدات لازم برای اتصال پیچی ریزشمع‌ها به پی فراهم گردید. لازم به ذکر است که انتخاب این زاویه بر اساس تحقیقات قبلی بوده است که به عنوان زاویه بهینه معرفی شده است [27]. به کمک کوپلرهای متصل شده به پی، چینش‌های مختلف ریزشمع‌ها در طول‌های مختلف قابل دستیابی است. رزوه ابتدایی ریزشمع‌ها نیز در شکل (۲) قسمت الف قابل مشاهده است.

بارگذاری افقی و قائم

قاب بارگذاری مورد استفاده در این مطالعات می‌بایست از صلبیت کافی برخوردار باشد تا در حین انجام آزمایش‌ها دچار تغییر شکل و یا جابه‌جایی نشود. بدین منظور برای ساخت قاب بارگذاری افقی از مقطع قوطی استفاده شده است. این قاب از دو

میلگرد به قطر ۲ سانتی‌متر تشکیل شده است که در فاصله ۱/۵ متری از یکدیگر قرار گرفته و به وسیله یک تیر با مقطع قوطی ۱۰×۱۰ سانتی‌متر در قسمت فوقانی به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین در قسمت پایینی ستون‌ها به‌منظور کنترل واژگونی قاب از اتصال تعدادی ناودانی و پلیت بهره جسته شده است. لازم به ذکر است که علاوه بر وجود عناصر تقویتی پایین ستون‌ها، در هنگام بارگذاری بر روی عناصر تقویتی وزنه‌هایی قرار داده شده است تا از تغییر مکان افقی و واژگونی قاب جلوگیری به عمل آید.

به‌منظور بارگذاری افقی در تیر فوقانی دو عدد سوراخ به قطر ۲ سانتی‌متر ایجاد شد تا مکان مناسب برای نصب قرقره فراهم گردد. در مرحله بعد قرقره به کمک دو عدد پیچ به طول ۴۰ سانتی‌متر و مهره‌های شماره ۱۶ به تیر فوقانی متصل شد و به کمک مهره‌ها در ارتفاع مناسب تنظیم گردید. به منظور انتقال بار افقی به پی، از کابلی به قطر ۵ میلی‌متر استفاده گردید، بدین صورت که با اتصال آن به پی و عبور آن از روی قرقره و اتصال آن به مخزن آب ۱۰۰ لیتری، بارگذاری افقی از طریق پر کردن مخزن با آب صورت بگیرد.

لازم به ذکر است که قبل از اعمال بارگذاری به‌منظور کنترل هر چه بیشتر واژگونی قاب، از دو عدد ناودانی به عنوان تکیه‌گاه ثانویه استفاده گردید. همان طور که در شکل (۳) مشخص است، از مخزن ماسه که دارای وزن بسیار بالایی بوده است، به منظور تکیه‌گاه ثانویه قاب استفاده گردید که با استفاده از این تکنیک تغییر شکل قاب در هنگام بارگذاری به حداقل مقدار رسید.



شکل ۳ مخزن ماسه به همراه قاب و مخزن آب بارگذاری

در این تحقیق به منظور اعمال سربار قائم از وزنه‌های استاندارد بهره جسته شد. این وزنه‌ها بر حسب مقدار مورد نیاز و قبل از اعمال بارگذاری افقی بر روی پی قرار می‌گیرند.

تغییرمکان‌سنج

برای اندازه‌گیری تغییر مکان قائم و یا افقی پی، از یک تغییرمکان‌سنج عقربه‌ای استفاده شده است تا میزان جابه‌جایی پی با دقت مناسبی برداشت شود. پی‌های مورد استفاده برای آزمایش‌ها از صلبیت کافی برخوردار بوده و همچنین در حین بارش ماسه و قبل از شروع آزمایش دقت شده است پی بر روی سطح خاک تراز باشد. از آنجا که در جریان بارش ماسه در مخزن حداکثر سعی بر آن بوده که تراکم در نقاط مختلف در هر لایه یکسان باشد، می‌توان گفت که میزان جابه‌جایی در تمام نقاط پی مورد آزمایش به صورت یکنواخت بوده و تغییر مکان به وجود آمده همان تغییر شکل لایه خاک است و پی به لحاظ سازه‌ای هیچ گونه تغییر شکلی نمی‌دهد. با توجه به تحقیق انجام شده توسط حسین و همکاران [3] و مشابهت تقریبی مدل‌سازی انجام شده توسط آنان با تحقیق حاضر، تغییرمکان‌سنج مورد استفاده در این تحقیق، از نوع عقربه‌ای با دامنه اندازه‌گیری ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انتخاب گردید.

لازم به ذکر است که دقت گیج‌های مورد استفاده در این تحقیق، توسط آزمایشگاه ابزار دقیق گروه مکانیک دانشگاه فردوسی بررسی شده و از صحت نتایج آن اطمینان حاصل گردیده است.

برنامه آزمایش‌ها

به‌منظور دستیابی به نتایج قابل مقایسه لازم است تا یک سری از آزمایش‌ها در حالات مختلف انجام شود، تا تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد جانبی و قائم این گونه از پی‌ها بررسی شود. از جمله پارامترهایی که ممکن است بر کارایی پی‌های تقویت شده با ریزشمع تأثیرگذار باشد، می‌توان ابعاد پی، تراکم خاک، جنس خاک، تعداد، طول و قطر ریزشمع، نحوه چینش، زاویه نصب و همچنین جنس ریزشمع را نام برد.

به‌منظور بررسی رفتار جانبی پی تقویت شده با ریزشمع، آزمایش‌های بارگذاری افقی در شرایط مختلف برنامه‌ریزی گردید. این آزمایش‌ها در دو سری (با دو نوع ریزشمع به طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری) انجام شده است. همچنین به منظور ارزیابی اثر تعداد ریزشمع، از چینش‌های ۲، ۴ و ۸ تایی بهره جسته شد. قبل از اعمال بار افقی به هر یک از سیستم‌های ریزشمع–پی، سربار قائم بر روی پی قرار گرفته است.

این سربار به صورت درصدی از ظرفیت باربری قائم سیستم بوده که در این تحقیق درصدهای ۰، ۱۵ و ۳۰ مورد بررسی قرار

گرفته است. در ادامه برنامه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و حالت‌های مختلف آن در جدول (۲) آورده شده است.

در جدول (۲) برای هر آزمون علامت اختصاری معرفی شده است که به‌صورت $P_nL_xV_y$ است که در آن n بیانگر تعداد ریزشمع، x طول آن بر حسب سانتی‌متر و y نسبت بار قائم به ظرفیت باربری بر حسب درصد است.

بررسی نتایج

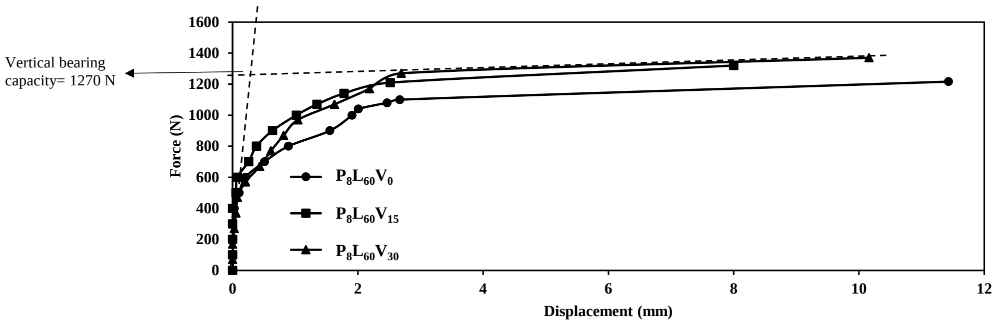
ظرفیت باربری جانبی

به‌منظور تعیین ظرفیت باربری جانبی پی تقویت شده با ریزشمع، همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد، از سیستم مخزن آب و قرقره استفاده شد. بارگذاری پی تا مرحله‌ای که جابه‌جایی آن به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کند ادامه پیدا کرد. به منظور ثبت نتایج نیز فیلم‌برداری صورت گرفته و پس از آزمایش، نتایج به صورت نمودار بار–جابه‌جایی رسم شده است. شکل (۵) به عنوان نمونه‌ای از نمودار بار نشست پی آورده شده است. همان طور که در این نمودار مشخص است، جابه‌جایی پی از مرحله‌ای به بعد به صورت ناگهانی افزایش یافته است.

به منظور تعیین ظرفیت باربری برای هر مدل پی، از تکنیک تقاطع‌یابی (Interception) بهره جسته شده است. در این روش دو خط بر نمودار بار–جابه‌جایی مماس می‌شود، یکی بر قسمت نهایی نمودار و دیگری بر ابتدای نمودار، محل تقاطع این خطوط بیانگر ظرفیت باربری پی است. در این شکل خطوط مماس به همراه مقدار ظرفیت باربری برای پی تقویت شده با ۸ ریزشمع در حالت ۳۰٪ بار قائم نیز نمایش داده شده است.

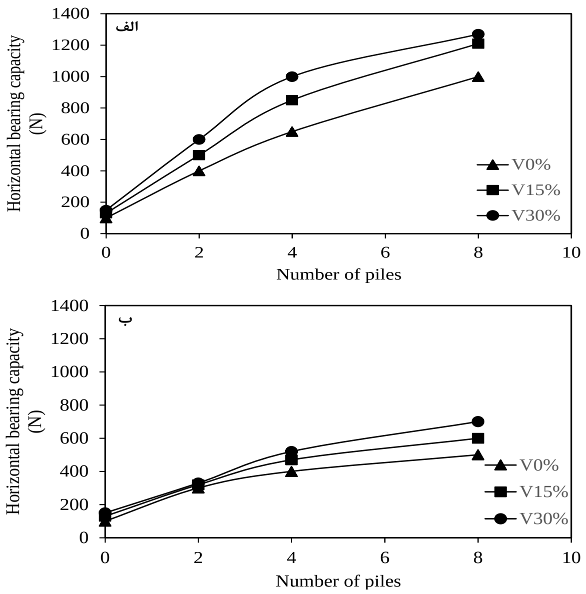
جدول ۲ برنامه آزمایش‌های صورت گرفته در تحقیق

شرایط بارگذاری	طول ریزشمع‌ها (cm)	تعداد ریزشمع‌ها	نسبت بار قائم (٪)	علامت اختصاری
افقی	۴۰	۲	۰	$P_2L_{40}V_0$
			۱۵	$P_2L_{40}V_{15}$
			۳۰	$P_2L_{40}V_{30}$
		۳	۰	$P_4L_{40}V_0$
			۱۵	$P_4L_{40}V_{15}$
			۳۰	$P_4L_{40}V_{30}$
		۸	۰	$P_8L_{40}V_0$
			۱۵	$P_8L_{40}V_{15}$
			۳۰	$P_8L_{40}V_{30}$
	۶۰	۲	۰	$P_2L_{60}V_0$
			۱۵	$P_2L_{60}V_{15}$
			۳۰	$P_2L_{60}V_{30}$
		۴	۰	$P_4L_{60}V_0$
			۱۵	$P_4L_{60}V_{15}$
			۳۰	$P_4L_{60}V_{30}$
		۸	۰	$P_8L_{60}V_0$
			۱۵	$P_8L_{60}V_{15}$
			۳۰	$P_8L_{60}V_{30}$

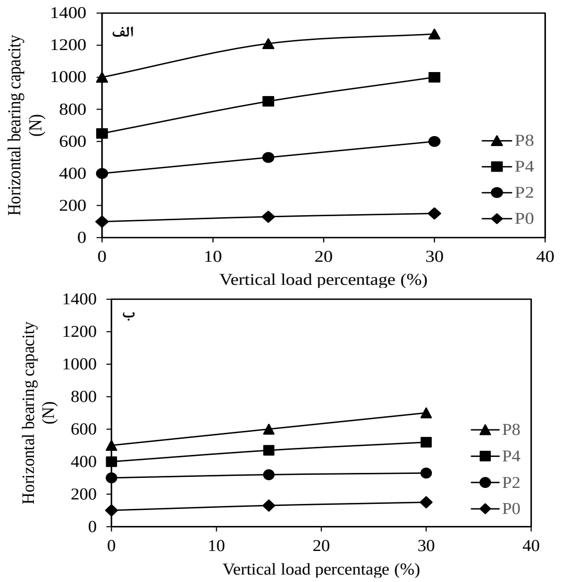


شکل ۵ نمودار بار جانبی- جابه‌جایی پی تقویت شده با ۸ ریزشمع تحت سربارهای قائم مختلف

شکل (۶) بیانگر ظرفیت باربری پی تقویت شده با تعداد مختلف ریزشمع تحت سربار قائم مختلف است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد ریزشمع، میزان ظرفیت باربری بهبود پیدا می‌کند. همچنین از مقایسه دو قسمت الف و ب شکل (۶) تأثیر افزایش طول ریزشمع به‌صورت واضح قابل تشخیص است. با وجود اینکه ظرفیت باربری دارای روند افزایشی در برابر تعداد ریزشمع است، اما این روند با کاهش شیب همراه بوده است. این مسئله بیانگر این موضوع است که میزان بهبود ظرفیت باربری از ۲ به ۴ ریزشمع بیشتر از مقدار آن از ۴ به ۸ ریزشمع در شرایط یکسان است. این پدیده به این دلیل است که افزایش تعداد ریزشمع‌ها باعث نزدیک‌تر شدن فواصل آن‌ها به یکدیگر می‌شود و در اثر این نزدیکی، نواحی پلاستیک ایجاد شده در اطراف ریزشمع‌ها با یکدیگر تداخل پیدا کرده و در نتیجه از میزان تأثیر به‌سازی کاسته می‌شود. از طرف دیگر ظرفیت باربری جانبی به میزان سربار قائم اعمال شده به پی نیز بستگی داشته است، در این تحقیق پی تحت سربارهای مختلف قرار گرفته است که نتایج آن در شکل (۷) نمایش داده شده است. همان گونه که انتظار می‌رود افزایش بار قائم باعث بهبود ظرفیت باربری افقی شده اما این افزایش در سیستم دو ریزشمع بسیار ناچیز بوده است. این پدیده به علت آن رخ می‌دهد که نیروی اصکاک بین ریزشمع‌ها و خاک ناچیز بوده و افزایش بار قائم هم نمی‌تواند مانع از بلند شدن پی از سطح خاک شود. در نتیجه به نیروهای قائم بیشتر از ۳۰ درصد نیاز است تا روند افزایشی مشاهده شود. از طرف دیگر در ریزشمع‌ها با تعداد بیشتر به دلیل بیشتر شدن نیروی اصطکاک، روند افزایشی ظرفیت باربری افقی قابل مشاهده است.



شکل ۶ تغییرات ظرفیت باربری پی تقویت شده با ریزشمع در برابر تعداد در حالات مختلف بار قائم و در طول: (الف) ۶۰cm، (ب)۴۰cm



شکل ۷ تغییرات ظرفیت باربری پی تقویت شده با ریزشمع در برابر بار قائم در تعداد مختلف ریزشمع و در طول: (الف)۶۰cm، (ب)۴۰cm

بررسی رفتار گروهی ریزشمع

به‌منظور بررسی رفتار ریزشمع در حالت گروهی ابتدا نیاز است تا رفتار تک شمع نیز بررسی شود. بدین منظور با کارگذاری تک ریزشمع در زاویه ۳۰ درجه و بارگذاری افقی آن، نسبت به استخراج نمودار بار- جابه‌جایی اقدام می‌شود. در شکل (۸) نمودار بار- نشست تک ریزشمع در طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری و در زاویه ۳۰ درجه آورده شده است. اکنون به‌منظور بررسی رفتار گروهی ریزشمع نیاز است تا رفتار هر تک شمع در حالت گروهی و نقشی که در باربری ایفا می‌کند مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور پارامتر LI با استفاده از رابطه (۲) تعریف می‌شود:

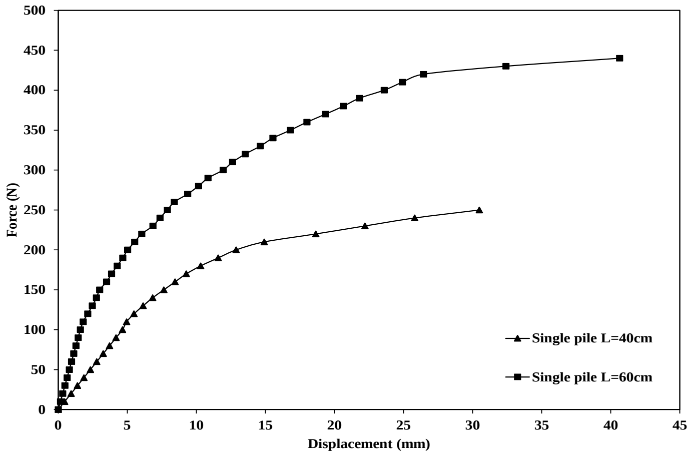
$$LI = \frac{F_g}{F_s} \quad (۱)$$

دراین‌رابطه F_g بیانگر نیروی وارده به هر تک ریزشمع در حالت گروهی و در جابه‌جایی مشخص بوده و F_s نیز نیروی وارد بر ریزشمع تک در همان جابه‌جایی است. به‌منظور بررسی رفتار گروهی ریزشمع این پارامتر در دو مرحله اندازه‌گیری شده است، یکی در حالت کرنش متناظر با گسیختگی (ε_y) و دیگری در کرنش معادل با ۵۰٪ تنش گسیختگی ($50\%\ \varepsilon_y$) به دست می‌آید. در ادامه تأثیر هر کدام از پارامترها بر LI مورد بررسی قرار می‌گیرد.

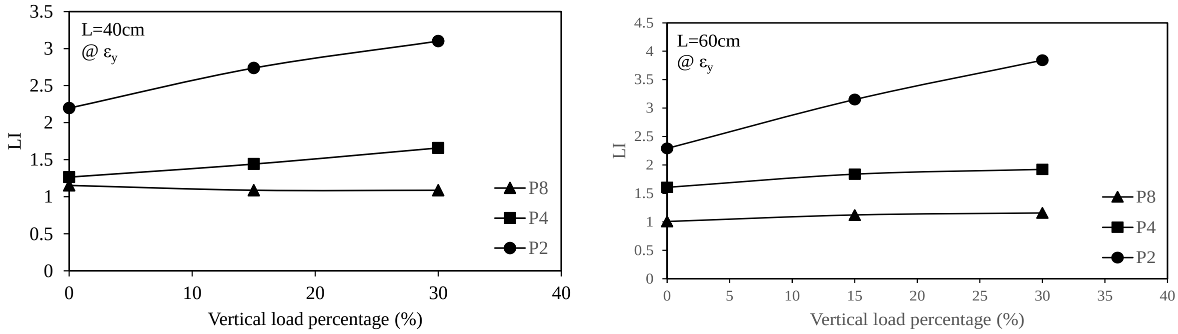
بررسی تأثیر سربار قائم. همان گونه که در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است افزایش بار قائم باعث ایجاد دو رفتار مختلف در شرایط متفاوت می‌گردد.

در حالت نزدیک به گسیختگی، به جهت رشد حوزه پلاستیک اطراف ریزشمع‌ها و تداخل حوزه آن‌ها در یکدیگر، افزایش سربار قائم تأثیر چندانی بر LI ندارد.

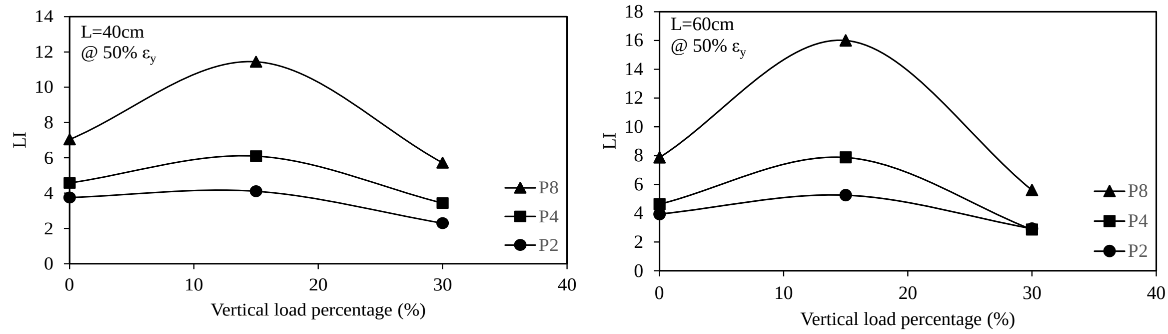
به عبارت دیگر این افزایش تأثیر قابل توجهی بر کارایی هر ریزشمع در حالت گروهی نداشته است. این در حالی است که افزایش سربار قائم باعث رشد کارایی ریزشمع‌ها در حالت ۲تایی (یک عدد در هر طرف پی) شده که این به علت عدم وجود حوزه تداخلی در مجاورت ریزشمع است. همان طور که مشخص است این رفتار در هر دو طول مختلف ریزشمع قابل مشاهده است.



شکل ۸ نمودار بار–جابه‌جایی جانبی تک ریزشمع در طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری



شکل ۹ تغییرات LI نسبت به بار قائم در شرایط نزدیک به گسیختگی و در طول: (الف) ۶۰cm، (ب) ۴۰cm



شکل ۱۰ تغییرات LI نسبت به بار قائم در شرایط ۵۰٪ گسیختگی و در طول: (الف) ۶۰cm، (ب) ۴۰cm

از طرف دیگر شکل (۱۰) که تغییرات پارامتر LI در شرایط ۵۰٪ ۵۰٪ گسیختگی را به تصویر کشیده نشان دهنده رفتاری متفاوت در برابر افزایش سربار قائم است. به عبارتی افزایش سربار ابتدا باعث افزایش نقش باربری هر تک ریزشمع در سیستم گروهی شده است، اما از سربار قائم ۱۵٪ به بعد یک افت در نمودار مشاهده می‌شود. از آنجا که پارامتر LI در شرایطی اندازه‌گیری شده که از حالت گسیختگی فاصله داشته و حوزه پلاستیک رشد چندانی نداشته است، بنابراین در ابتدا افزایش سربار باعث افزایش اصطکاک بین ریزشمع‌ها با خاک گشته و در نتیجه نمودار رشد داشته است. همچنین با وجود این که سربار قائم تا ۱۵٪ افزایش یافته است، در حدی نبوده که بتواند اصطکاک بین پی و خاک را فعال نماید. اما با رسیدن به حد ۳۰٪ اتصال بین پی و خاک در حین بارگذاری برقرار مانده است و اصطکاک بین آن‌ها وارد عمل می‌شود. در نتیجه از نقش باربری هر تک ریزشمع در سیستم گروهی کاسته شده و رفتار کاهشی در نمودار مشاهده می‌شود. همچنین از دقت در اشکال فوق می‌توان به این نکته پی برد که در تمامی شرایط (نزدیک به گسیختگی یا ۵۰٪ گسیختگی) مقادیر LI در شرایطی که طول ریزشمع‌ها بلندتر است، بیشتر می‌باشد و علت آن به جهت افزایش نیروی اصطکاکی است که بین خاک و ریزشمع وجود دارد.

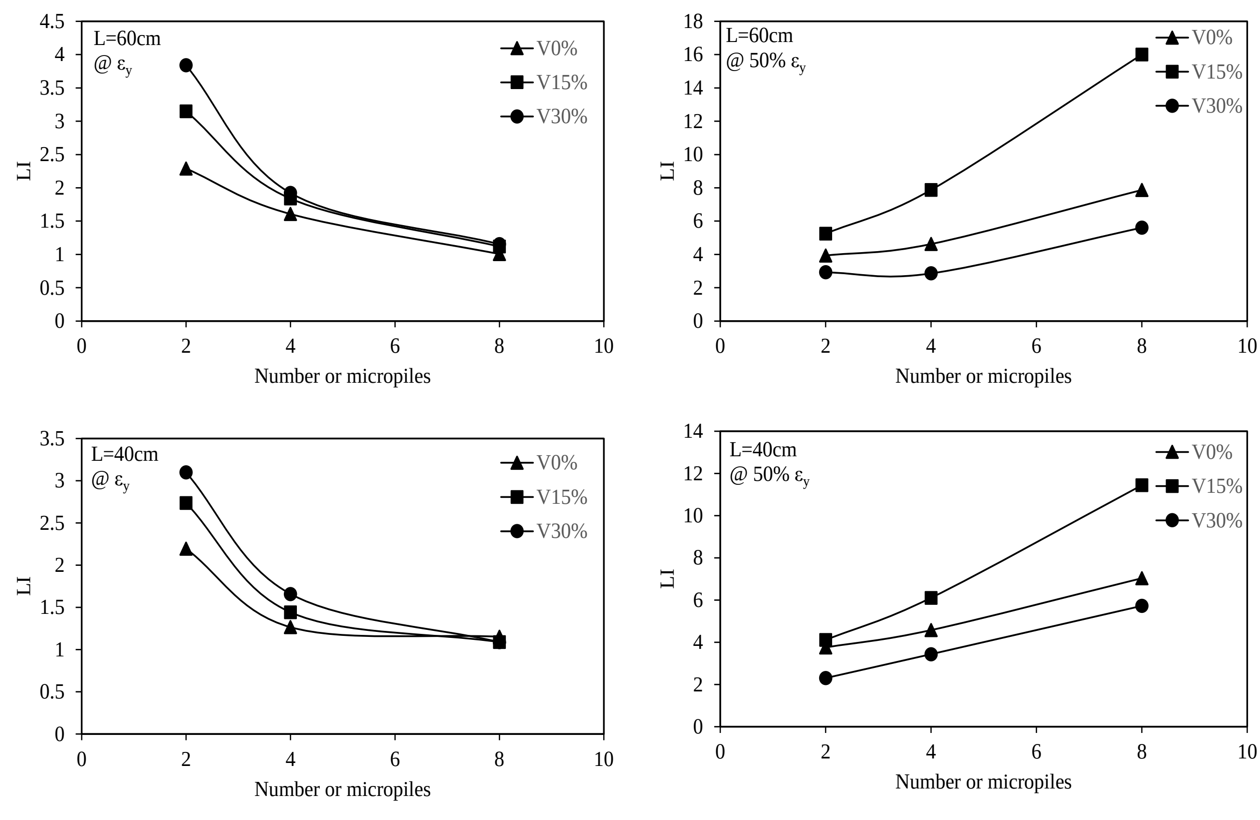
بررسی اثر تعداد ریزشمع. شکل (۱۱) نشان دهنده تأثیر افزایش تعداد ریزشمع بر پارامتر LI در شرایط مختلف است. همان گونه که دیده می‌شود هر دو طول ریزشمع رفتار مشابه داشته، بدین صورت که در ناحیه الاستیک افزایش تعداد ریزشمع باعث افزایش نقش هر کدام در تأمین ظرفیت باربری گشته و در نتیجه عملکرد گروهی بهبود پیدا می‌کند. این در حالی است که با نزدیک شدن به ناحیه پلاستیک یا گسیختگی، روند به صورت کاهشی تغییر می‌یابد. همان طور که در قسمت قبل ذکر شد دلیل این پدیده گسترش حوزه پلاستیک ریزشمع‌ها و اختلال آن‌ها با یکدیگر است. در نتیجه نقش گروهی ریزشمع‌ها کاهش یافته و حتی در تعداد ریزشمع بالا با وجود افزایش ظرفیت باربری، اثر گروهی ریزشمع‌ها از بین رفته (LI≈1) و هر کدام از ریزشمع‌ها مانند یک تک ریزشمع مستقل در باربری ایفای نقش می‌کنند.

با توجه به نمودارها می‌توان پی برد که رفتار LI در برابر تعداد ریزشمع از روند خاصی پیروی می‌کند، طبق بررسی‌های

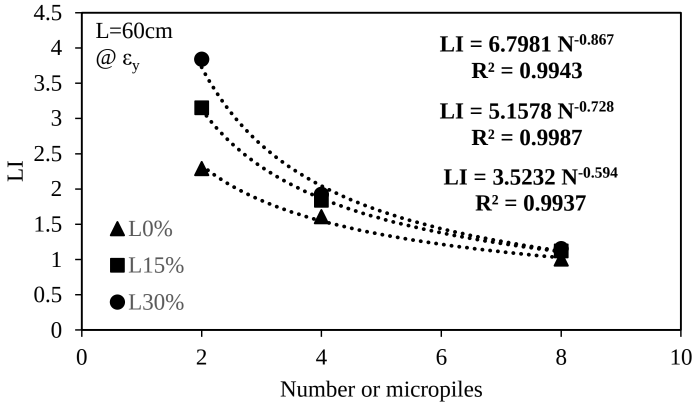
انجام شده، تابع نمایی بالاترین دقت را در برازش داشته است. در نتیجه برای تخمین مقدار LI در تعداد ریزشمع مختلف رابطه (۲) معرفی شده است.

$$LI = kN^n \qquad (۲)$$

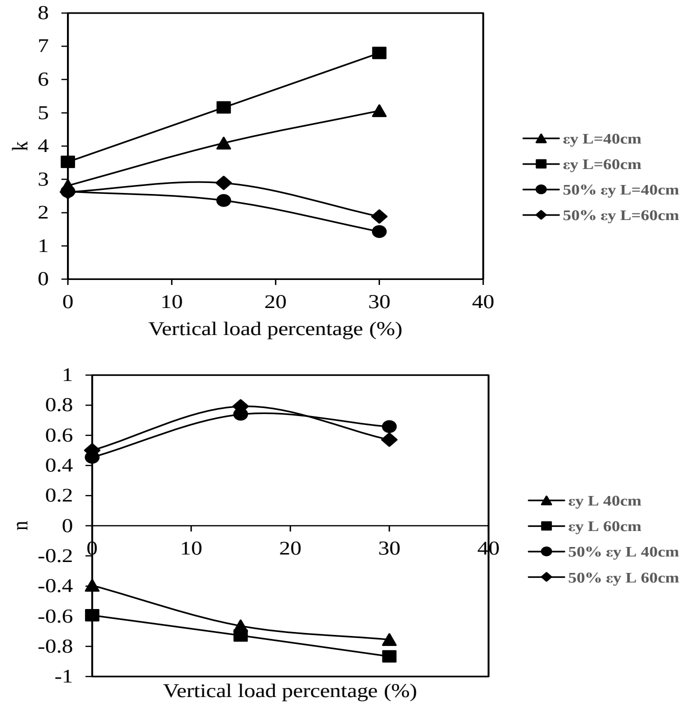
در رابطه (۲) N بیانگر تعداد ریزشمع، k بیانگر میزان LI اولیه بوده است که با افزایش تعداد ریزشمع تغییر می‌کند. شدت این تغییر نیز وابسته به پارامتر n است که هر چه مقدار آن بیشتر باشد تغییرات شدیدتر خواهد بود. شکل (۱۲) نمونه‌ای از نحوه برازش منحنی، مقادیر k و n و همچنین میزان خطای هر کدام آورده شده است. لازم به ذکر است که میزان خطا در تمامی برازش‌ها کمتر از ۹۰ درصد نشده است. شکل (۱۳) نمایش‌دهنده تغییرات مقادیر n و k در برابر بار قائم است. در این شکل تغییرات برای هر دو حالت نزدیک به گسیختگی و فاصله‌دار از آن رسم شده است. همان طور که مشخص است، پارامتر k مانند LI رفتار متفاوتی را در دو حالت از خود نشان می‌دهد. به عبارتی زمانی که نزدیک به گسیختگی هستیم افزایش سربار باعث افزایش مقدار LI یا همان k می‌شود. از آنجا که k بیانگر مقدار LI در زمانی است که تعداد ریزشمع خیلی کم می‌شود، لذا مربوط به حالتی است که ناحیه پلاستیک تداخلی تشکیل نیافته است و در نتیجه در این شرایط هر چه سربار قائم بیشتر شود مقدار LI نیز افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر مقدار k در شرایط ۵۰٪ گسیختگی ابتدا افزایش یافته و سپس از بار قائم ۱۵٪ کاهش پیدا می‌کند،که علت آن در قسمت‌های قبل عنوان شده است.



شکل ۱۱ تغییرات LI در شرایط مختلف



شکل ۱۲ نحوه برازش نمودار نمایی بر مقادیر LI نسبت به تعداد ریزشمع



شکل ۱۳ تغییرات n و k در برابر بار قائم در شرایط مختلف

بنابراین، وابستگی مقدار LI به تغییر تعداد ریزشمع نیز بیشتر می‌شود؛ لذا با افزایش سربار مقدار n در حالت گسیختگی منفی‌تر (مقدار عددی آن بزرگ‌تر) گشته است. اما در حالت ۵۰٪ گسیختگی، همان گونه که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، اصطکاک بین پی و خاک وارد عمل شده است و لذا باعث ایجاد رفتار افزایشی کاهشی در نمودار n می‌گردد. البته لازم به ذکر است که مقادیر n در این حالت تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. به عبارت دیگر در حالتی که از گسیختگی فاصله داشته باشیم، تغییرات پارامتر LI در برابر تعداد وابستگی چندانی به طول ریزشمع‌ها ندارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پی تقویت شده با استفاده از ریزشمع پرداخته شده است. بدین منظور پی مربعی با بعد ۲۰ سانتی‌متر، با تعداد ۲، ۴ و ۸ ریزشمع به طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری تقویت شده و در داخل خاک ماسه‌ای و به صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی شده و تحت بار جانبی استاتیکی قرار گرفته است. اثر

تعداد، طول و نقش گروهی این ریزشمع‌ها در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت که مهم‌ترین نتایج آن به شرح زیر است:

۱. در شرایطی که پی با تعداد اندکی ریزشمع (۲ عدد) تقویت شده باشد، این ریزشمع‌ها هنگامی که پی تحت بار جانبی قرار گرفته است نتوانسته مانع از جدا شدن پی از خاک شوند و در نتیجه افزایش سربار قائم تا ۳۰ درصد ظرفیت برابری قائم، تأثیر چندانی بر ظرفیت باربری ندارد و تنها ۱۰۰ نیوتن ظرفیت باربری را بهبود بخشیده است.

۲. اثر افزایش تعداد ریزشمع در شرایطی که طول یکسان باشد، تأثیر بسیار بیشتری نسبت به افزایش سربار قائم دارد. برای مثال افزایش سربار قائم در بهترین حالت تنها ۲۰ درصد باعث بهبود ظرفیت باربری گشته است و این در حالی است که افزایش تعداد ریزشمع، به دلیل افزایش قابل توجه سطح درگیری سیستم پی-ریزشمع با خاک، ظرفیت باربری را در بهترین حالت تا ۷۲۰ درصد بهبود بخشیده است.

۳. نقش مقاومتی ریزشمع‌ها در تأمین ظرفیت برابری وابسته به پارامترهای مختلف از جمله سربار قائم است. با افزایش سربار دو رفتار متفاوت مشاهده شده است، در شرایطی که کرنش جانبی ایجاد شده در سیستم پی- ریزشمع از کرنش گسیختگی فاصله دارد افزایش سربار قائم از یک حد مشخص (بین ۱۵ تا ۳۰ درصد ظرفیت برابری قائم) باعث فعال شدن اصطکاک بین پی و خاک گشته و در نتیجه از نقش مقاومتی ریزشمع‌ها کاسته می‌شود. اما در شرایط نزدیک به گسیختگی به جهت جدا شدن پی از سطح خاک تأثیر این پارامتر حذف شده و در نتیجه افزایش سربار باعث افزایش نقش باربری هر ریزشمع می‌گردد.

۴. از دیگر پارمترهای مهم در رفتار گروهی ریزشمع‌ها، حوزه پلاستیک اطراف آن‌ها است. با افزایش تعداد ریزشمع و نزدیک شدن آن‌ها به یکدیگر، حوزه پلاستیک گسترش پیدا کرده و به دلیل تداخل آن‌ها با یکدیگر و کاهش نیروی اصطکاک ریزشمع با خاک، نقش باربری هر ریزشمع با افزایش تعداد آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. اما در شرایطی که حوزه پلاستیک گسترش نیافته است (فاصله داشتن کرنش از کرنش گسیختگی)، این افزایش تعداد، نقش ریزشمع‌ها را افزایش می‌دهد.

۵. از دیگر نتایج این تحقیق که می‌توان به آن اشاره کرد ارائه رابطه‌ای است که با استفاده از آن و ضمن داشتن نمودار بار جابه‌جایی تک ریزشمع، مقدار نیروی وارد بر آن را در حالت گروهی و در شرایط مختلف بارگذاری پیش‌بینی کرد. این مقدار در فرایند طراحی ریزشمع‌ها می‌تواند به طراح کمک نماید.

واژه نامه

ریزشمع	Micropile
ظرفیت باربری	Bearing capasity
بار جانبی	Latral load
بار قائم	Vertical load
مدول الاستیسیته	Ealstic modulus
رفتار گروهی	Group behavior
پی	Foundation

سپاسگزاری

مراجع

[1] D. A. Bruce, A. F. DiMillio, I. Juran, “Introduction to micropiles: an international perspective,” *InProceedings of the Conference of the Geotechnical Engineering Division of the ASCE in Conjunction with the ASCE Convention*, pp. 1-26, ASCE, 1995.

[2] A. Elsawwaf, A. Nazir, W. Azzam, “The behavior of micropiled raft foundations subjected to combined vertical and lateral loading: numerical study,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 16, no. 3, pp 187, 2023.

[3] Z. Hussain, B. Sharma, T. Rahman, “ Micropile group behaviour subjected to lateral loading,” *Innovative*

Infrastructure Solutions, 2019.

[4] L. Wen, G. Kong, Q. Li, Z. Zhang, "Equivalent diameter of grouted micropile embedded in marine soft clay under lateral load," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **vol. ???,** pp.3-12, Feb, 2020.

[5] B. A. Malik, M. Y. Shah, V. A. Sawant, " Influence of micropile parameters on bearing capacity of footings," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 35, pp 74-83, 2021.

[6] W. El Kamash, J. Han, " Numerical analysis of existing foundations underpinned by micropiles," *International Journal of Geomechanics*, vol. 28, no. 6, 2017.

[7] S. N. Rao, V. G. Ramakrishna, M. B. Rao, " Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 6, pp. 542-549, 1998.

[8] A. Elsawwaf, M. El. Sawwaf, A. Farouk, F. Aamer, H. El. Naggar, " Restoration of tilted buildings via micropile underpinning: a case study of a multistory building supported by a raft foundation,"*Buildings*, vol.12, no. 2, pp.422, 2023.

[9] K. Kershaw, R. Luna, " Scale model investigation of the effect of vertical load on the lateral response of micropiles in sand," *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, vol. 12, no. 1, pp. 3-15, 2018.

[10] A. M. Alnuaim, M. H. El. Naggar, H. El. Naggar, " Performance of micropiled rafts in clay: Numerical investigation," *Computers and Geotechnics*, vol. 99, pp. 42-54, 2018.

[11] N. Borthakur, A. K. Dey, " Experimental investigation on load carrying capacity of micropiles in soft clay," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, no. 4, pp. 1969-1981, 2018.

[12] K. A. Kershaw, R. Luna, " Full-scale field testing of micropiles in stiff clay subjected to combined axial and lateral loads," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineerin*, vol. 140, no. 1, pp. 255-261, 2014.

[13] A.Y. Abd Elaziz, M. H. El. Naggar, " Performance of hollow bar micropiles under monotonic and cyclic lateral loads," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 141, no. 5, 2015.

[14] B. Sharma, S. Sarkar, Z. Hussain, " A study of parameters influencing efficiency of micropile groups," *InGround Improvement Techniques and Geosynthetics: IGC*, Singapore, pp.11-18, 2016.

[15] T. H. Lee, I. J. Chul, C. Kim, " A method for reinforcing the ground adjacent to the footing using micropiles," *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 34, no. 4, pp. 341-355, 2016.

[16] A. Bhattacharjee, S. Mittal, A. Krishna, " Bearing capacity improvement of square footing by micropiles," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 113-118, 2011.

[17] N. Unnikrishnan, P. Sachin, " Influence of confining micro piles on the bearing capacity of sand," *InContemporary topics in deep foundations*, pp. 367-374, 2009.

[18] A. M. Alnuaim, H. El. Naggar, M. H. El. Naggar, " Performance of micropiled raft in sand subjected to vertical concentrated load: Centrifuge modeling," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 33-45, 2015.

[19] J. N. Jha, S. K. Shukla, " Bearing capacity and settlement characteristics of sand subgrades with vertical reinforcement supporting a square footing," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, pp. 1-3, 2015.

[20] A. E. Elsaied, " Performance of footing with single side micro-piles adjacent to slopes," *Alexandria Engineering*

Journal, vol. 53, no. 4, pp.903-910, 2014.

[21] B. Sharma, " A model study of micropiles subjected to lateral loading and oblique pull,"*Indian Geotechnical Journal*, vol. 41, no. 4, pp. 196-205, 2011.

[22] J. E. Bowles, *Foundation analysis and design*, 1st ed. Reading, 1988. [E-book] Available: Google e-book.

[23] M. Kazemi, J. Bolouri Bazaz, " Reconstruction of a Large Scale Sand Specimen Using a Sand Curtain Rainer System," *Journal of Engineering Geology*, vol. 11, no. 2, pp. 277-298, 2017.

[24] D. M. Wood, A. Crewe, C. Taylor, " Shaking table testing of geotechnical models," *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 2, no.1, pp. 01-13, 2002.

[25] A. Farouk, " Behavior of micropiles under vertical tension and compression loads," *InProceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1243-1246, 2009.

[26] J. L. Pastor, J. M. Ortega, M. A. Climent, I. Sánchez, " Skin friction coefficient change on cement grouts for micropiles due to sulfate attack," *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 80-86, 2018.

[27] S. Abedini, J. Bolouri Bazaz, " Improving the bearing capacity of shallow foundations using inclined micropiles. Twelfth International Congress on Civil Engineering," *12th International Congress on Civil Engineering*, Iran, Ferdowsi University of Mashhad, July 21-23, 2021.